

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 338. 45: 621

А.И. ВАСИЛЬЕВ, д-р екон. наук,
В.А. КОВАЛЬ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК

Розглянуто питання ціноутворення газотурбінних двигунів українського виробництва різної потужності для енергетики. Наведено методику прогнозування життєвого циклу виробу.

Ключові слова: газотурбінний двигун, потужність, компресор, турбіна, трудомісткість виготовлення, ціна

Рассмотрены вопросы ценообразования газотурбинных двигателей украинского производства разной мощности для энергетики. Показана методика прогнозирования стоимости жизненного цикла изделия.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, мощность, компрессор, турбина, трудоемкость изготовления, цена

The questions of pricing of gas turbine engines of Ukrainian production of different power for power engineering are considered. The technique of forecasting the cost of the product life cycle is shown.

Keywords: gas turbine engine, power, compressor, turbine, labor input, price

За последние 20 лет стационарные газотурбинные установки (ГТУ) заняли прочное место в энергетике ведущих и развивающихся стран мира с заметной долей газа и нефти в топливном балансе. На первом месте по применению ГТУ находится США, где установленная мощность в начале XXI столетия составляет более 60 млн. кВт. Всего в мире эксплуатируется более 13 тыс. энергетических ГТУ общей мощностью около 200 млн. кВт.

Газотурбостроение является одной из наиболее наукоемких и высокотехнологичных отраслей энергомашиностроения в любой развитой стране. Украина входит в десятку ведущих стран мира с полным циклом разработки и производства газотурбинных двигателей (ГТД) и установок для авиации, флота и наземного промышленного применения. К числу таких специализированных предприятий относятся ГП «Ивченко-Прогресс» и ПАО «Мотор Сич» (г. Запорожье), ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев). В ряде случаев авиационные ГТД запорожского производства конвертированы в стационарные ГТУ различного назначения, например, в газотурбинные электростанции ПАЭС-2500, ЭГ-1000, АИ 336-10, АИ-318-25 и другие [1].

О достигнутом уровне развития и совершенства украинских

энергетических газовых турбин можно судить по данным рис.1, где показана зависимость КПД ГТУ от генерируемых мощностей машин.

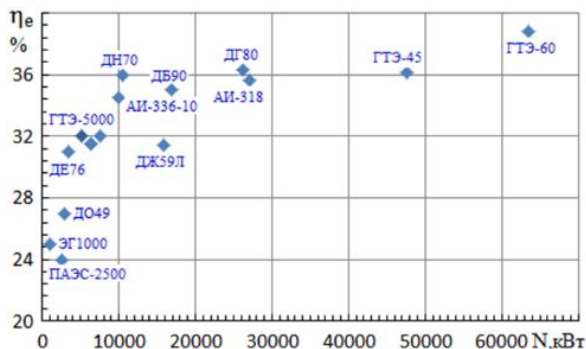


Рисунок 1 – Зависимость КПД энергетических ГТУ украинской разработки от мощности двигателя

Термодинамические параметры цикла π_k^* (степень повышения полного давления в компрессоре), T_g^* (температура газа перед турбиной) и мощность установки, влияющие на КПД машины, определяют и конструктивный облик ГТД/ГТУ. Величины π_k^* и T_g^* проектируемой ГТУ выбираются после технико-экономического анализа в зависимости от назначения установки и требований к ней с учетом важности показателя экономичности двигателя, его размера или массы.

Повышение температуры T_g^* возможно в случае применения жаропрочных/жаростойких сплавов и совершенствования системы охлаждения лопаток турбины. Платой за повышение температуры является высокая стоимость изготовления деталей турбины, продолжительный срок доводки и, как следствие, большие затраты на НИОКР. Часто высокий уровень T_g^* является причиной снижения показателей надежности и (или) увеличения затрат на техническое обслуживание. Иногда уменьшение температуры газа является единственным способом обеспечения требуемого ресурса двигателя. В этом случае для сохранения мощности ГТД необходимо обязательно проводить мероприятия по повышению КПД лопаточных машин, чтобы сохранить конкурентоспособность изделий на мировом рынке.

Рыночная цена изделия в основном зависит от стоимости его жизненного цикла (СЖЦ), которая определяется всеми затратами на создание и эксплуатацию ГТД в период назначенного ресурса машины [1], т.е. включает в себя:

– стоимость двигателя (затраты на НИОКР, строительные-монтажные и пусконаладочные работы при создании первого опытного образца, а также дальнейшие затраты в процессе серийного производства ГТД);

– затраты на топливо в течение всего периода эксплуатации;

– стоимость безвозвратных потерь масла и расхода материалов за жизненный цикл;

– затраты на ремонтно-техническое обслуживание (РТО) с учетом поставки запасных частей;

– прочие расходы (содержание обслуживающего персонала, плата за экологические проблемы, таможенные пошлины и др.).

Согласно приведенной выше структуре затрат при оценке СЖЦ однотипного изделия (без учета инфляции и дисконта) баланс затрат выражается соотношением $C_{жц} = C_{дв} + C_{топл} + C_{рто} + C_{пр}$. С учетом дисконта (приведения экономических показателей разных лет к сопоставимому во времени периоду) и инфляции эту формулу можно записать в виде

$$C_{жц} = C_{дв} + \sum_{t=1}^T k_d \cdot k_u^t \cdot (C_{дв} + C_{топл} + C_{рто} + C_{пр}), \quad (1)$$

где k_d – коэффициент дисконтирования, связанный с величиной дисконта E ($E = 0,08 \dots 0,12$) соотношением $k_d = 1/(1 + E)^t$; k_u – коэффициент инфляции ($k_u = 1,03 \dots 1,05$ для западной экономики, в отечественной практике $k_u = 1,08 \dots 1,10$); t – шаг (год) эксплуатации; T – продолжительность жизненного цикла двигателя (в годах), определяемая отношением $T = T_{нр}/T_{ср}$ ($T_{ср}$ – назначенный ресурс, $T_{ср}$ – среднегодовая наработка двигателя).

При эксплуатации по техническому состоянию продолжительность жизненного цикла T принимается равной сроку службы двигателя.

В процессе серийного изготовления ГТД производится массовая закупка материалов, специальных сплавов, агрегатов и пр. по ценам, в общем-то, не соответствующим конкурентной среде их производства, поскольку в ряде отраслей еще существуют монополистические признаки. Это отражается на высоком уровне цен покупных материалов и комплектующих изделий. Заработная плата основных рабочих в данный период определяется трудоемкостью изготовления двигателей и стоимостью нормо-часа. Трудоемкость изготовления ГТД в опытном производстве ранее обычно составляла 2,5...3-кратную трудоемкость первого серийного образца. Однако в настоящее время в связи с совмещением технологической подготовки серийного производства стало возможным значительно снизить трудоемкость изделия уже в опытном производстве. Как правило, с переходом на серийное производство представляется возможным значительно уменьшить

трудозатраты. Это может быть связано с рядом обстоятельств, например с упрощением каких-либо конструкций узлов и других мероприятий. Например, в процессе передачи ГТД Д049, разработки ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», для серийного производства на одно из предприятий отрасли возникла необходимость усовершенствования узла поворота направляющих лопаток первой группы ступеней осевой части осецентрибежного компрессора (рис. 2, а).

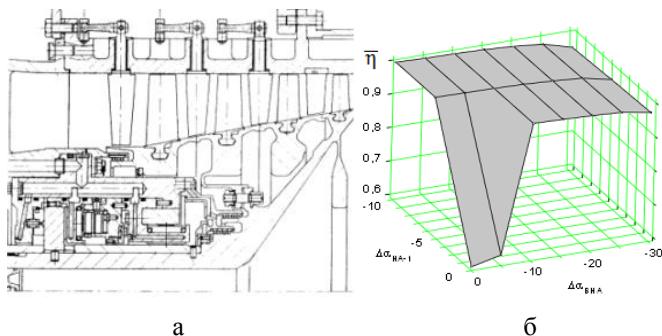


Рисунок 2 – Исходная конструкция узла первых осевых ступеней осецентрибежного компрессора ГТД Д049 (а) и влияние угла поворота ВНА и НА-1 на КПД первых двух ступеней (б)

В исходном варианте предусматривалось регулирование компрессора поворотом первых трех лопаточных аппаратов (ВНА, НА-1 и НА-2). Однако численные исследования [2] показали, что указанное регулирование машины является достаточно «глубоким» и в некоторых случаях может быть неоправданно перестраховочным. С этой целью выполнен параметрический анализ влияния различных углов установки трех указанных регулируемых аппаратов на КПД двух первых ступеней компрессора. Предусмотрено исключение регулирования второго направляющего аппарата (НА-2).

На рис.2,б показаны графики изменения относительного КПД двухступенчатого компрессора $\bar{\eta} = \eta/\eta_p$ в зависимости от угла установки ВНА $\Delta\alpha_{BHA}$ на режиме работы $n = 11060$ об/мин. Здесь величина η_p соответствует КПД двухступенчатого компрессора на расчетном режиме $n = 14000$ об/мин. При этом полагалось, что угол установки НА-1 изменялся в диапазоне значений $\Delta\alpha_{HA-1} = -10^\circ, -5^\circ$ и 0° , а второй направляющий аппарат не регулировался ($\Delta\alpha_{HA-2} = 0^\circ$).

Из рис. 2, б следует, что в случае регулировании компрессора только за счет поворота ВНА (переключки НА-1 и НА-2 отсутствует) КПД двухступенчатого блока уменьшается до уровня $\bar{\eta} = 0,65$ при $\Delta\alpha_{BHA} = 0^\circ$, а при $\Delta\alpha_{BHA} = -30^\circ$ – снижается на 3%. Анализ результатов исследования

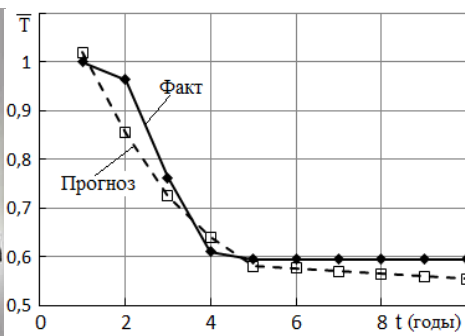
свидетельствует о существенной роли НА-1 в регулировании машины в плане увеличения его КПД. Устранение поворотного аппарата НА-2 приводит к упрощению конструкции при условии сохранения достаточно высокого уровня КПД ($\bar{\eta} = 0,985 \dots 0,99$) и запасов газодинамической устойчивости ($\Delta K_{y \min} = 11\%$) [3].

Устранение регулирования НА-2, расположенного уже в области повышенного давления, приведет к снижению утечек воздуха из проточной части машины, что благоприятно скажется на КПД всего компрессора.

Данное мероприятие наряду с другими конструктивными изменениями в конечном итоге позволяет значительно снизить трудоемкость серийного изделия Д049 (рис.3,а), что наглядно демонстрирует графическая зависимость \bar{T} от периода выпуска серийной продукции (в годах t), показанная на рис.3,б. Здесь $\bar{T} = T_1/T_{\min}$ – относительная трудоемкость, как отношение трудоемкости ГТД в первый год его выпуска к трудоемкости уже стабилизированного производства.



а



б

Рисунок 3 – Общий вид ГТД Д049 (а)

и зависимость относительной трудоемкости его изготовления от года выпуска (б)

При прогнозировании трудоемкости изготовления ГТД необходимо оценить параметр λ , учитывающий уровень механизации $k_{\text{мех}}$ производства [4] (табл.1), а также трудоемкость изготовления первого опытного образца T_1 .

Таблица 1

| $k_{\text{мех}}$ | $\leq 30\%$ | 40% | 50% | 60% | 70% | $\geq 80\%$ |
|------------------|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|
| λ | 0,4 | 0,348 | 0,295 | 0,256 | 0,22 | 0,18 |

Уровень механизации (%) определяется как удельное соотношение трудоемкости механизированных и всех работ в технологическом процессе изготовления изделия.

Снижение трудоемкости с ростом размера партии запуска в производство можно учесть поправочным коэффициентом $k_{\text{парт}}$, который равен 1, если в партии 1...4 штуки и $k_{\text{парт}} = 0,8$, если запущено в изготовление более пяти изделий. В технологическом процессе изготовления деталей и узлов ГТД необходимо рассматривать и степень оснащенности $k_{\text{осн}}$, которая оценивается как доля трудоемкости изготовления оснастки к трудоемкости полного оснащения ($k_{\text{осн}} = 0$ при оснащенности опытного производства, $k_{\text{осн}} = 1$ при 100% оснащенности серийного производства).

Для прогнозирования теоретической трудоемкости можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$T_i = \frac{T_1}{i^{\lambda \cdot k_{\text{парт}} \cdot k_{\text{осн}}}}, \quad (2)$$

где i – порядковый номер изделия в серийном производстве, T_1 – трудоемкость первого серийного образца (по сути, опытного образца).

С учетом приведенных выше соотношений фонд заработной платы на одно изделие можно оценить как $\Phi_{\text{ЗП } i} = T_i \cdot k_{\text{чел час}} \cdot \text{Ч}_{\text{ЗП}}$. При перевыполнении норм коэффициент $k_{\text{чел час}} \leq 1$, а при невыполнении $k_{\text{чел час}} > 1$ (планируемый $k_{\text{чел час}} = 1,2$ [4]). Здесь $\text{Ч}_{\text{ЗП}}$ – почасовая заработная плата. Накладные расходы (условно-переменные и условно постоянные) целесообразно рассчитать с учетом подходов, изложенных в [4].

Для оценки первой составляющей СЖЦ ГТД – затрат на НИОКР, строительно-монтажные и пусконаладочные работы при создании первого опытного образца ($C_{\text{жц}}$) можно воспользоваться данными [1] или статистической зависимостью относительной удельной цены \bar{C}^* (\$США/МВт) от номинальной мощности машины (МВт)

$$0,08210N^2 - 5,7321N + 182,5. \quad (3)$$

Стоимость годового потребления топлива определяется выражением

$$C_{\text{топл}} \approx 3600 \cdot NT_{\text{год}} \cdot C_{\text{т}} \cdot k_{\text{экс}} / (\eta_{\text{е}} \cdot H_{\text{у}}), \quad (4)$$

где N мощность ГТД, кВт; $T_{\text{год}}$ – годовая наработка, ч; $C_{\text{т}}$ – стоимость топлива на данный период, \$США/кг; $k_{\text{экс}}$ – статистический эксплуатационный коэффициент, учитывающий загрузку, техническое состояние, климатические и другие эксплуатационные данные машины, $k_{\text{экс}} = 0,88...0,92$; $H_{\text{у}}$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{е}}$ – эффективный КПД установки (рис. 1).

Затраты на РТО ГТД можно оценить с помощью соотношения [1]

$$C_{\text{рто}} = \frac{k_a}{T} \sum_{i=0}^T (C_{\text{эр}} + C_{\text{ст}})_i + \frac{C_{\text{доп}}}{Z \cdot T}, \quad (5)$$

где T – расчетный срок службы, лет; k_a – коэффициент внеплановых (аварийных и вынужденных) внеплановых работ, $k_a = 1,05 \dots 1,1$; $C_{\text{эр}}$ – сумма затрат на каждом i – этапе графика РТО в течение всего периода эксплуатации (запасные части, заводской ремонт и пр.); $C_{\text{ст}}$ – сумма затрат на станционные работы; $C_{\text{доп}}$ – дополнительные единовременные затраты на обеспечение РТО (запас основных узлов и деталей, покупка обменных и резервных двигателей, оплата ремонтных бригад и др.); Z – планируемое число агрегатов, для которых необходимы $C_{\text{доп}}$;

Для оценки входящих в формулу (5) стоимостных составляющих $C_{\text{рто}}$ можно ориентироваться на статистические показатели, выраженные в удельной форме, а именно [1]:

- относительная стоимость заводского ремонта (по отношению к стоимости нового привода); $0,3 \dots 0,35$;

- относительные затраты на покупку запасных частей (по отношению к общей стоимости РТО); $0,6 \dots 0,7$;

- относительная стоимость работ, проводимых на станции (по отношению к общей стоимости РТО); $\sim 0,1$.

Оценки свидетельствуют, что в общем балансе затрат стоимость привода составляет примерно $16 \dots 18\%$, топлива – $60 \dots 65\%$, РТО – $15 \dots 20\%$, масла и материалов – $1 \dots 2\%$ и прочих расходов – $\sim 1\%$.

Список литературы: 1. Конвертирование авиационных двигателей в стационарные газотурбинные установки [Текст] / В.А. Коваль, Ю.М., Ануров, Е.А. Ковалева и др. – Х.: Монограф, 2010. – 244 с. 2. Использование 3-D и 2-D комплексов CFD при аэродинамической доводке осевых компрессоров газотурбинных двигателей [Текст]/ Ю.М. Ануров, В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов// Насосы. Турбины. Системы. – 2012. - №3(4). – С. – 5 – 11. 3. Коваль В.А. О влиянии радиального зазора на границу срыва осевого компрессора ГТД [Текст]/ В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов// Фундаментальные проблемы применения современных ГТУ в отечественной экономике – результаты освоения и эксплуатации и задачи на будущее: сб. докл. сессии РАН, Казань, 2017 г. – М., 2017. – С. 15 – 22. 4. Ласточкин Ю.В. Модели конкурентоспособности машиностроительного предприятия [Текст]/ Ю.В. Ласточкин, И.И. Ицкович, В.А. Пономарев. – М.: Изд-во Рос. эконом. акад., 2004. – 192 с.

Bibliography (transliterated): 1. Konvertirovanie aviacionnyh dvigatelej v stacionarnye gazoturbinnye ustanovki [Tekst] / V.A. Koval', Ju.M., Anurov, E.A. Kovaleva i dr. – H.: Monograf, 2010. – 244 s. 2. Ispol'zovanie 3-D i 2-D kompleksov CFD pri aerodinamicheskoj dovodke osevyh kompressorov gazoturbinnih dvigatelej [Tekst]/ Ju.M. Anurov, V.A. Koval', E.A. Kovaleva, V.V. Romanov// Nasosy. Turbiny. Sistemy. – 2012. - №3(4). – S. – 5 – 11. 3. Koval' V.A. O vlijanii radial'nogo zazora na granicu sryva oseвого kompressora GTD [Tekst]/ V.A. Koval', E.A. Kovaleva, V.V. Romanov// Fundamental'nye problemy primeneniya sovremennyh GTU v otechestvennoj ekonomike – rezultaty osvoenija i jekspluatacii i zadachi na budushhee: sb. dokl. sessii RAN, Kazan', 2017 g. – M., 2017. – S. 15 – 22. 4. Lastochkin Ju.V. Modeli konkurentosposobnosti mashinostroitel'nogo predpriyatija [Tekst]/ Ju.V. Lastochkin, I.I. Ickovich, V.A. Ponomarev. – M.: Izd-vo Ros. jekonom. akad., 2004. – 192 s.